

库水位骤降作用下库岸滑坡形成机理研究

樊任华¹ 程建设² 樊义永¹

(1. 上饶市鸿安水利水电勘测设计咨询有限公司, 江西 上饶 334000;

2. 瑞昌市水利局, 江西 瑞昌 332200)

【摘要】 库水位骤降严重威胁着库岸边坡的稳定。基于饱和-非饱和土理论, 采用渗流有限元法和稳定计算的 Bishop 法和 Janbu 法, 计算确定不同水位骤降工况下渗流场及安全系数的演化情况。结果表明: 库水位骤降会严重降低边坡的稳定系数, 随着库水位下降速率的增大, 稳定系数降低更多, 此外, 稳定系数随着库水位的逐渐平稳而上升。根据计算结果可以得出库水位诱发库岸滑坡的机理主要体现在孔隙水压激增及累积效应、渗流拖拽、渗透破坏效应、应力集中及转移效应。

【关键词】 库水位骤降; 库岸滑坡; 机理

中图分类号: TV698.2+32

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2018)05-059-05

Study on reservoir bank landslide formation mechanism under the action of reservoir water level sudden drop

FAN Renhua¹, CHENG Jianshe², FAN Yiyong¹

(1. Shangrao Hongan Water Conservancy and Hydropower Exploration Design Consulting Co., Ltd., Shangrao 334000, China;

2. Ruichang Water Conservancy Bureau, Ruichang 332200, China)

Abstract: Sudden drop of reservoir water level seriously threatens the stability of bank slope. Seepage finite element method, stability calculation Bishop method and Janbu method are adopted to calculate and determine seepage field and safety coefficient evolution condition under different water level sudden drop based on the saturated - unsaturated soil theory. The results show that sudden drop of reservoir water level may severely lower the slope stability coefficient, the stability coefficient is reduced to lower level with the increase of reservoir water level drop rate. In addition, the stability coefficient is increased with gradual stability of the reservoir water level. It can be concluded according to calculation results that the mechanism of inducing reservoir bank landslide by reservoir water level is mainly manifested in pore water pressure surge, cumulative effect, flow drag, seepage failure effect, stress concentration and metastasis effect.

Key words: reservoir water level sudden drop; reservoir bank landslide; mechanism

20 世纪以来, 中国相继建设了一大批大型水电工程, 其中大部分位于西南山区, 如锦屏、二滩、小湾。大坝建成蓄水后, 数百米的水位突升会严重威胁坝后库岸边坡的稳定性。此外, 周期性的水位波动也会加重

对边坡稳定的威胁。库岸边坡一旦失稳发生滑动, 将会酿成不可预估的灾害。例如, 1958 年法国马尔帕塞水电站发生库岸滑坡, 导致了下游区数百人员的伤亡^[1-2]。2003 年, 发生在三峡库区的千将坪滑坡造成

了20多人的伤亡以及长江航运的中断,经济损失严重^[3]。因此,研究库岸边坡在库水位作用下的响应机制对其防灾减灾具有非常重要的意义。

根据朱冬林等^[4]的调查结果,库岸滑坡主要发生在两个时期,即初次蓄水时期和库水骤降时期。巴亚东等^[5]等研究了水位变化作用下,折线型黄土滑坡的失稳模式。贾逸等^[6]研究了库水位升降对库岸边坡的影响。然而,针对库水位变化作用下,库岸边坡岩体饱和-非饱和转化以及渗流应力集中效应的研究相对较少。

本文结合非饱和土理论和有限元计算,考虑不同库水位工况作用下,库岸边坡渗流场及稳定的演化特征。并根据计算结果,分析库水位骤降对库岸边坡作用的机理。

1 基本计算理论

1.1 饱和-非饱和渗流理论

受到水电站调度的影响,水库水位周期性的波动造成库岸边坡岩土材料随时处于饱和-非饱和状态,其渗流特性与岩土材料的饱和度有很大关系。然而,基于质量守恒方程和达西定律可以得到如下所示的二维饱和-非饱和渗流 Richards 方程^[7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中 k_x, k_y ——水平和垂直方向上的饱和土体渗透系数, m;

ρ_w ——水的密度, kg/m³;

g ——重力加速度, m/s²;

m_w ——比水容量,其物理含义是 θ_w 对基质吸力 ($u_a - u_w$) 偏导数取负数, 见式(2):

$$m_w = - \frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)} \quad (2)$$

式中 $u_a - u_w$ ——土体的基质吸力, Pa。

基于有限单元法可对式(2)进行计算,计算边界条件包括水头边界条件和流量边界条件,可参考罗红明^[8]、刘新喜^[9]等研究成果。此外,基质吸力作为一个重要的参数,对非饱和土体的工程性质具有重要影响,其基本的特征可以用土-水特征曲线来形容,主要反映

基质吸力和含水率以及渗透系数的关系。通常来说,其关系可以通过经验公式拟合确定,常见的拟合模型包括 Garder^[10]、Van Genuchten^[11]和 Fredlund&Xing^[12]等模型。本文选择较为常用的 Fredlund&Xing 模型,其计算公式如下所示:

$$S_e = \left(\frac{1}{\ln \left(e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right)} \right)^m \quad (3)$$

式中 S_e ——有效饱和度, $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$;

h ——基质吸力水头, m;

m, n, a ——拟合参数;

θ_s ——饱和含水率;

θ_r ——剩余体积含水率;

θ ——体积含水率。

1.2 边坡稳定计算

基于上述有限元方法可以确定边坡在库水位变化条件下的渗流场,同时,本文假设土体满足 Mohr-Coulomb 强度准则条件,然后基于简化 Bishop 法和简化的 Janbu 法确定边坡的稳定系数。

2 计算实例分析

2.1 计算模型

图1所示为一均质土坡,其材料计算参数^[13]见表1。假设该边坡的初始蓄水位为25.00m,不同的水位下降工况见表2。基于 Fredlund&Xing 模型并参考经验取值 ($a = 6.37; n = 12.9; m = 2.24$) 拟合确定基质吸力、渗透系数和含水量的关系(见图2)。

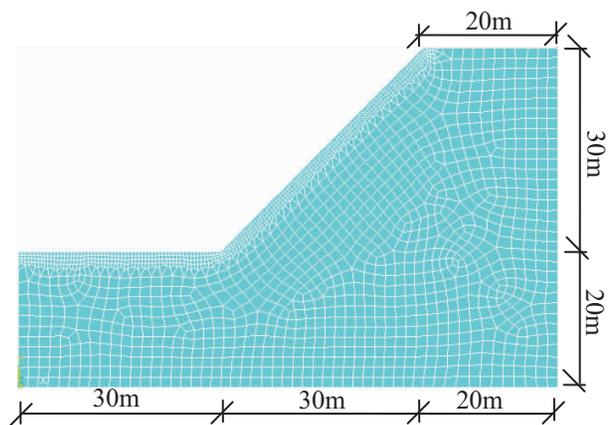


图1 边坡几何模型

表1 计算参数

弹性模量/ MP	泊松比	凝聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	渗透系数/ (m/s)
10	0.3	0.03	36.9	5.00×10^{-6}

表2 水位运行工况

工况1	库水位/m	25	20	15	10	5	5
	时间/d	0	1	3	5	30	50
工况2	库水位/m	25	15	15	10	5	5
	时间/d	0	1	3	5	30	50

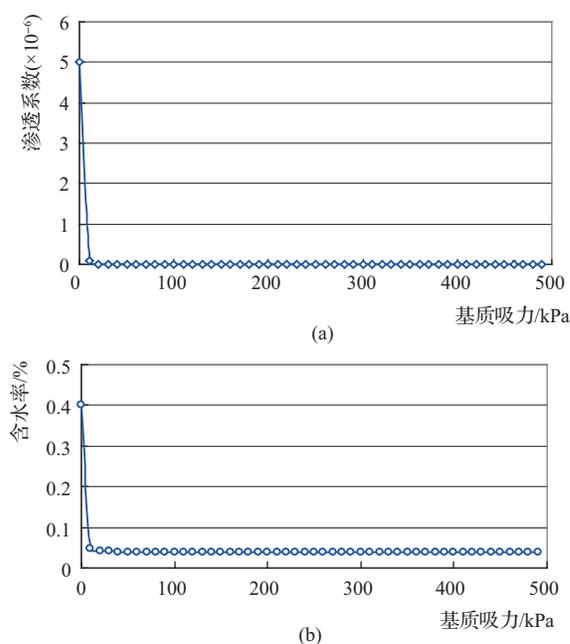


图2 土壤-水特征曲线

2.2 计算结果及分析

工况1的计算结果如图3所示。从图3中可以看出,库水位骤降能够明显威胁边坡的稳定,并且随着水位的不断下降,安全系数越来越低,但是随着库水位波

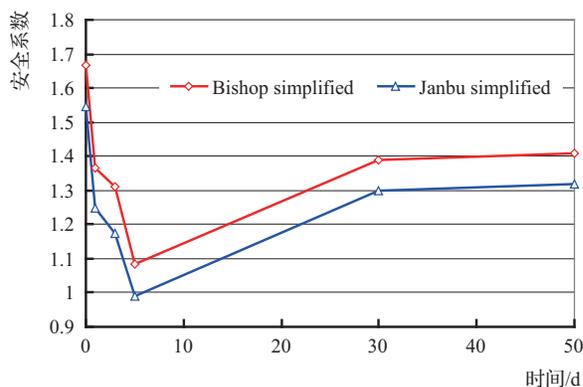


图3 工况1边坡安全系数演化过程

动情况不断趋于平缓,安全系数会不断上升,直到逐渐稳定。

工况2的计算结果如图4所示。在该工况下,边坡的稳定趋势和工况1基本相似,但是存在两点明显差异。首先,水位第一次下降后,边坡在工况2条件下的安全系数(1.364,毕肖普算法)小于工况1条件下的安全系数(1.002,毕肖普算法),即表明水位骤降速率越大,越能威胁边坡稳定;其次,由于工况2在第1~第3天存在一个稳定期,即水位没有波动,导致后期在相同水位波动情况下,工况2的安全系数明显高于工况1的条件,这表明库水位对边坡威胁存在一个累加效应。这也是导致工况2存在一个尖峰的原因。这为水电站调蓄带来了一个新思路:在相同时间、相同调度水位的情况下,期间保持水位尽量平稳过渡、降低调度速率,能够大大提高库岸边坡的稳定性能。

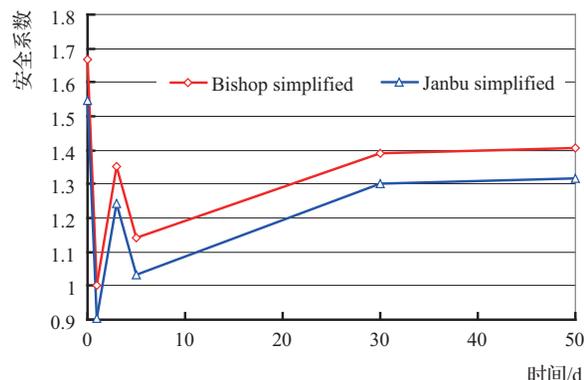


图4 工况2边坡安全系数演化过程

3 机理讨论分析

库水位骤降这一动力作用对库岸边坡的影响主要体现在水力效应^[14-15]上,一方面水位骤降,导致孔隙水压激增,有效应力明显降低;同时,水位下降过程中会产生沿着坡脚方向的渗透拖拽力,在很大程度上增加了边坡的滑动力。本文将结合工况2计算结果,对库水位骤降的机理进行更加直观的分析。

边坡滑动面孔隙水压的时空分布特征如图5所示。当库水位发生骤降后,边坡内部的孔隙水压会大幅度提高,而且孔隙水压的增加程度会随着水位波动的速率增大而增大,就是水位骤降速率越快,边坡的稳定系数也越低的原因。同时,从图5中可以看出,随

随着水位不断下降,孔隙水压会不断升高,直到水位趋于稳定,并且经过一定的时期,孔隙水压才会逐渐消散。该结论能够很好揭示库水位对边坡的威胁存在累加效应的原因,这是由于在该水位稳定期间,为孔隙水压的消散提供了一个时机,减小了孔隙水压的积累。

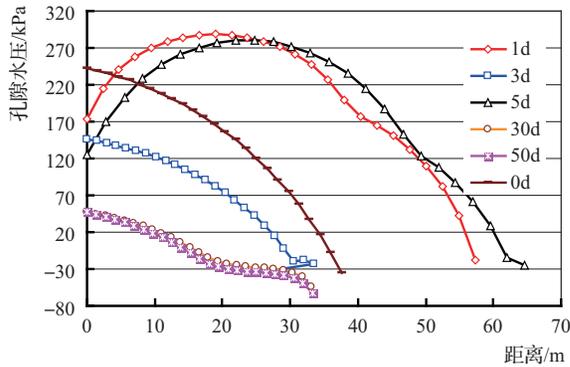


图5 孔隙水压时空演化特征

如图6所示,当水位发生骤降时,由于水头差会导致沿着滑动面方向形成一股渗流拖拽效应,并且水位骤降越快,渗流拖拽效应越明显,渗流拖拽效应也会随着库水位的稳定逐渐消失。值得注意的是,渗流拖拽效应不仅体现在增加额外的下滑力,还可能发生渗透破坏,导致边坡颗粒流失,由此带来边坡结构的改变。

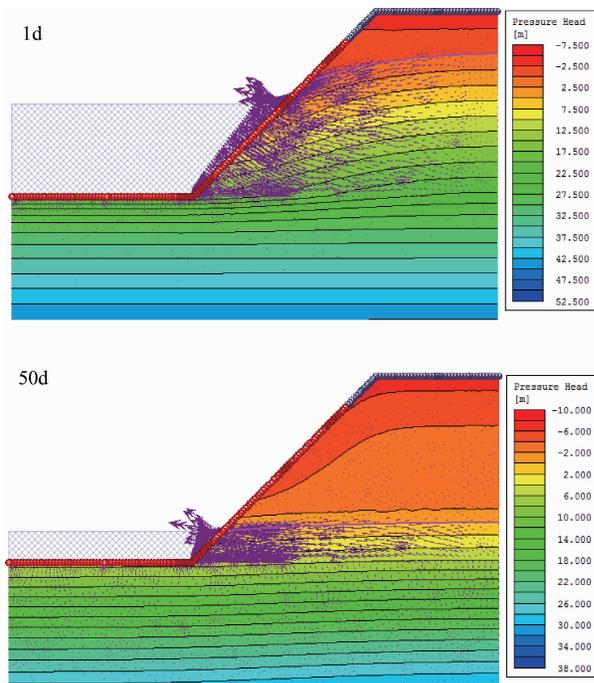


图6 边坡内部渗流方向演化特征

从应力状态来看,边坡在库水位骤降作用下,会引起边坡内部应力场的调整,从而适应当前荷载状态。边坡内部的剪切应力状态会随着库水位的骤降不断提高,并且会形成一个剪应力集中区域,如图7所示。从图7可以看出,一般应力集中会首先出现在滑动面剪出口,当该集中的剪应力超过边坡岩土材料抗剪强度时,就会导致该区域发生相对变形,从而造成局部破坏。如果库水位不断变化,该应力集中区域会逐渐向上、向内扩张,最终发生整体失稳。随着库水位波动逐渐稳定后,边坡的应力集中程度逐渐降低至正常值。

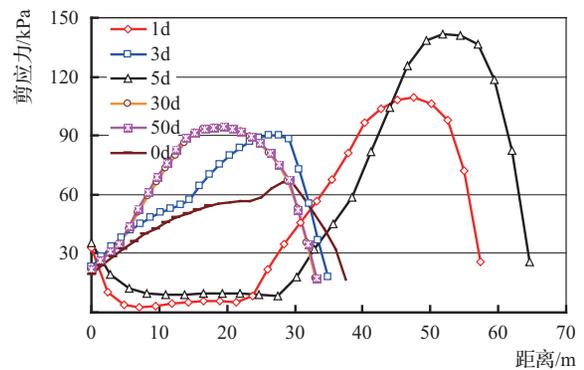


图7 剪应力时空演化特征

4 结论

库水位下降会严重影响库岸边坡的稳定。本文基于饱和-非饱和土理论,采用有限元渗流分析,并结合边坡稳定系数计算的 Bishop 法和 Janbu 法,针对两种不同工况,确定了边坡在库水位骤降作用下的渗流和稳定演化过程。通过研究得出如下结论:

a. 库水位下降会使得边坡的稳定系数降低,并且下降速率越快,稳定系数降低越多。此外,在水位下降过程中若存在水位平稳过渡区,边坡的安全系数能够有效得到提高。

b. 库水位下降威胁边坡稳定的机理主要体现在孔隙水压激增,并且存在一个累加效应。此外,水位下降后带来的水头差引发了渗流拖拽效应,甚至可能导致渗透破坏。同时,库水位变化后,会在剪出口形成一个应力集中区域,并且随着库水位不断的波动,该应力集中区域会向坡体内部和上部扩张,最终诱发边坡整体失稳。◇

参考文献

- [1] Londe P. The Malpasset dam failure[J]. Engineering Geology, 1987,24(1-4):295-329.
- [2] Petronio L,Boaga J,Cassiani G. Characterization of the Vajont landslide (North-Eastern Italy) by means of reflection and surface wave seismics [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016(128):58-67.
- [3] 殷跃平,彭轩明. 三峡库区千将坪滑坡失稳探讨[J]. 水文地质工程地质,2007,34(3):51-54.
- [4] 朱冬林,任光明,聂德新,等. 库水位变化对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质,2002(3):6-9.
- [5] 巴亚东,杨秀娟,闫林,等. 水位变化时折线型均质黄土岸坡失稳过程试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(3):182-185.
- [6] 贾逸,任光明. 某库岸滑坡在水库运行条件下稳定性的动态变化[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(5):24-30.
- [7] 荣冠,张伟,周创兵. 降雨入渗条件下边坡岩体饱和和非饱和渗流计算[J]. 岩土力学,2005,26(10):1545-1550.
- [8] 罗红明,唐辉明,章广成,等. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2008(5):687-692.
- [9] 刘新喜,夏元友,练操,等. 库水位骤降时的滑坡稳定性评

(上接第 69 页)的渠道,只能采取人工清淤的方式^[8]。鉴于很多渠道处于交通不便的地区,人工清淤仍然是最普遍的清淤方法。人工清淤的效率与渠道淤积的具体情况有很大关系,一般为 $2 \sim 4\text{m}^3/\text{工日}$,如果渠道较小,可以达到 $5 \sim 6\text{m}^3/\text{工日}$ 。人工清淤一般每年在秋收后和春季解冻后各进行 1 次。

5 结 语

灌区渠道工程的管理和维护对保证渠道的正常输水,发挥其应有的功能具有重要意义。要做好渠道的管理和维护,不仅要在全面分析渠道维护管理的综合技术措施的前提下,依据渠道的特点、功能需求,采取合适的技术措施,更需要全面强化运行维护管理工作,形成严格的约束管理机制,从技术和制度两方面强化管理,才能提高管理维护工作水平。◆

参考文献

- [1] 罗凯. 农田水利工程中渠道的维护管理及保养探讨[J]. 农

价方法研究[J]. 岩土力学,2005,26(9):1427-1431.

- [10] Gardner W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958, 85(4):228-232.
- [11] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. [J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(44):892-898.
- [12] Fredlund D G,Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal,1994,31(4):521-532.
- [13] 童富果. 降雨条件下坡面径流与饱和-非饱和渗流耦合计算模型研究[D]. 宜昌:三峡大学,2004.
- [14] Yin, Y., Huang, B., Wang, W., et al. Reservoir-induced landslides and risk control in three gorges project on yangtze river, china[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2016,8(5):577-595.
- [15] 王明华,晏鄂川. 水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J]. 岩土力学,2007,28(12):2722-2725.
- [16] 康锋,陶春洁,李志强. 水位降落期堤防上游边坡抗滑稳定初步研究[J]. 水利建设与管理,2016,36(5):22-24.
- [17] 李世娟. 小型水库土石坝稳定分析[J]. 水利建设与管理,2015,35(3):27-29.
- [18] 孙君,于春梅. 新建灌溉渠道泡水试渠方法[J]. 水利天地,2007(4):37.
- [19] 丁志良,王长德,谈广鸣,等. 渠系蓄量补偿下游常水位运行方式研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2011,19(5):700-711.
- [20] 邢俊海,邓昌军. 浅谈水利工程渠道维护与渠道管理措施——以新疆地区为例[J]. 中国水运(下半月),2014,14(5):226-227.
- [21] 盛小燕,雷斌. 渠道工程的管理养护[J]. 现代农业科技,2012(3):284-286.
- [22] 刘晓杰,化晓锋,陈伟,等. 新型渠道清淤技术与设备研究[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(5):189-192.
- [23] 张俊萍,齐书善,候平亮,等. 开封引黄涵闸供水渠道防淤减淤保障机制[J]. 黄河水利职业技术学院学报,2010,22(2):9-11.
- [24] 马倩林. 关于北引渠道冲淤成因的分析及对清淤的意见[J]. 水利天地,2003(S1):38-39.